



东南大学
能源与环境学院
school of energy and environment seu

核反应堆控制及核电站仪控系统

复杂控制系统1 串级控制系统



复习：串级控制系统概念



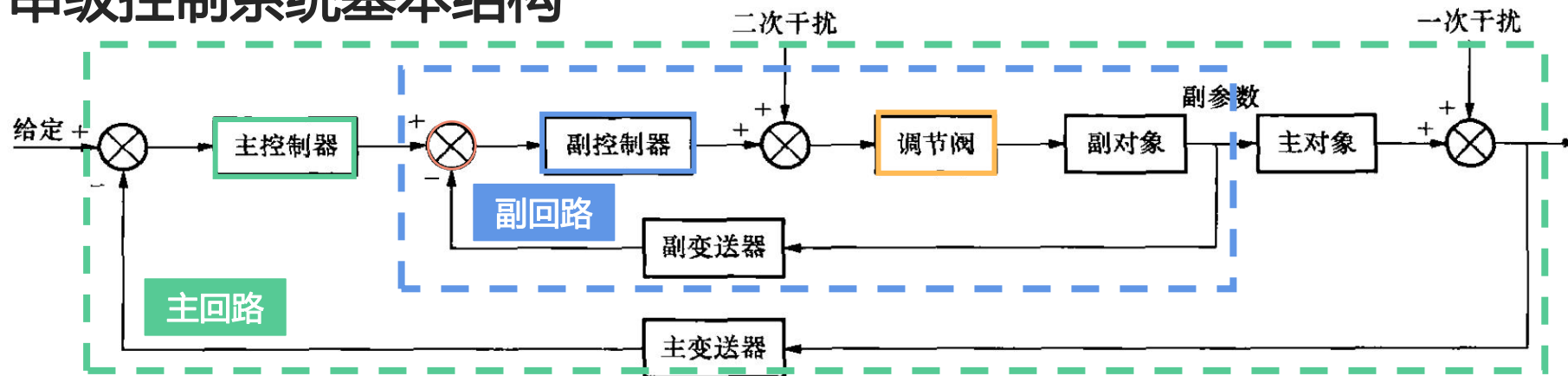
- 单回路控制系统局限性

控制过程缓慢，对干扰控制不及时，总滞后较大。

- 串级控制系统

- 两个闭合回路，主、副控制器串联，主控制器输出作为副控制器给定值
- 提前控制副参数，快速消除干扰

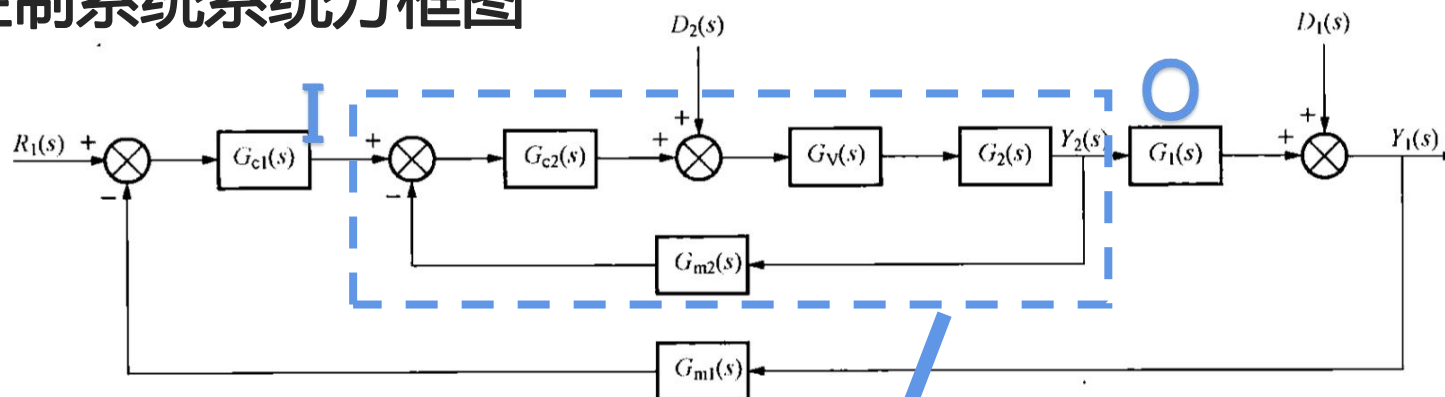
- 串级控制系统基本结构



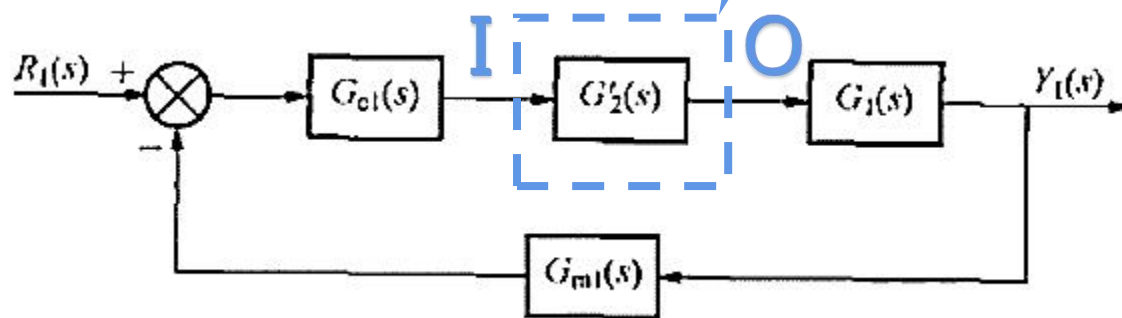
复习：串级控制系统概念



串级控制系统系统方框图



串级控制系统等效形式方框图



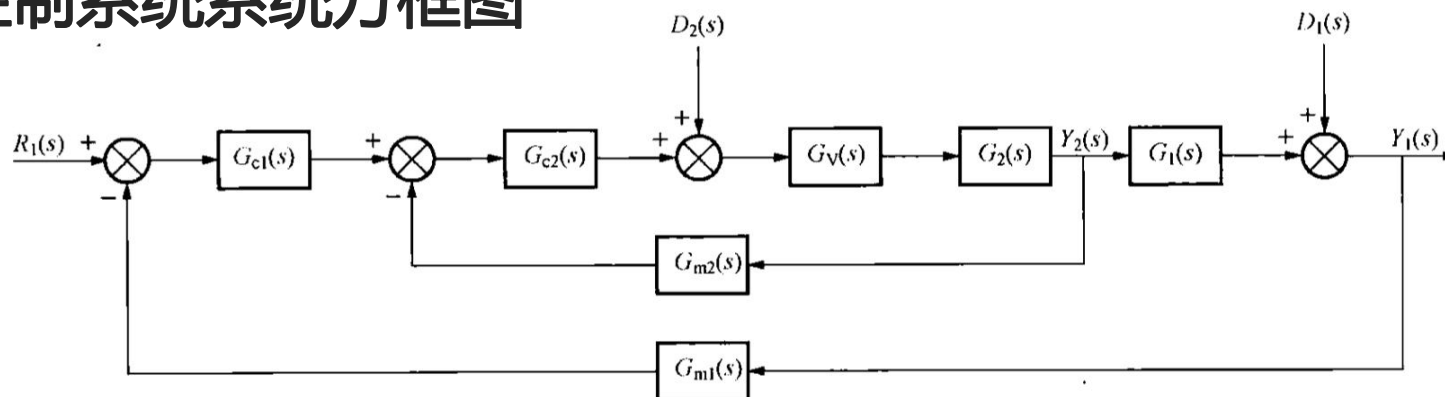
副回路传递函数：

$$G'_2(s) = \frac{G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s)}$$

复习：串级控制系统概念



- 串级控制系统系统方框图



- 系统传递函数->动态特性

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

本节学习内容



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

- 串级控制系统的特点分析
- 串级控制系统的应用范围
- 串级控制系统的设计原则
- 串级控制系统的整定

串级控制系统的特点分析

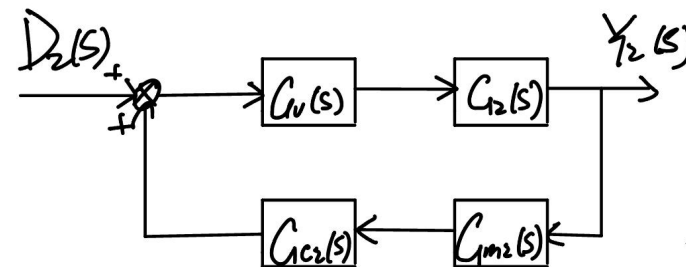
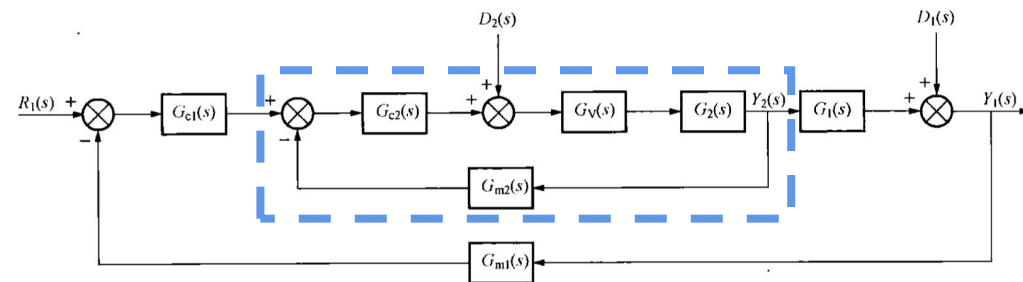


東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 特点1：能迅速克服二次扰动的影响

- 串级控制系统副环扰动通道传递函数
(二次干扰对副参数的影响)：

$$\frac{Y_2(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s)}$$



串级控制系统的特点分析



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 特点1：能迅速克服二次扰动的影响

- 串级控制系统副环扰动通道传递函数（二次干扰对副参数的影响）：

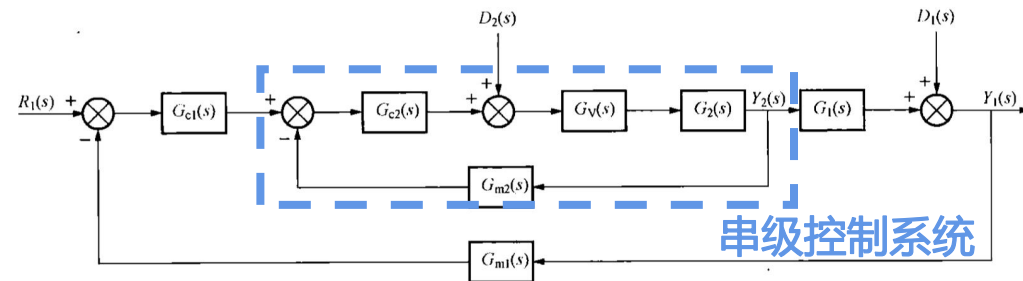
$$\frac{Y_2(s)}{D_2(s)} = \frac{G_V(s)G_2(s)}{1 + G_{c2}(s)G_V(s)G_2(s)G_{m2}(s)}$$

- 单回路控制系统二次干扰传递函数：

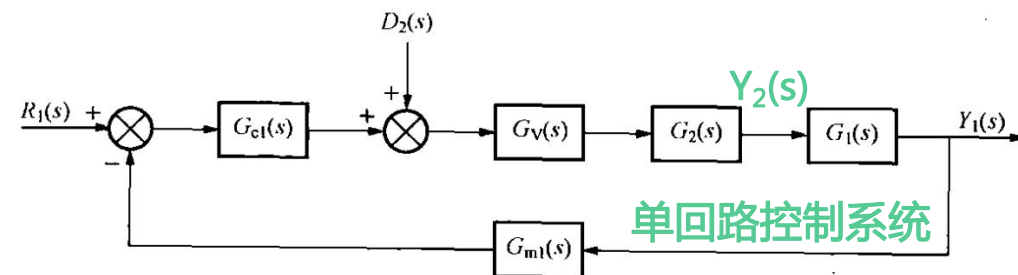
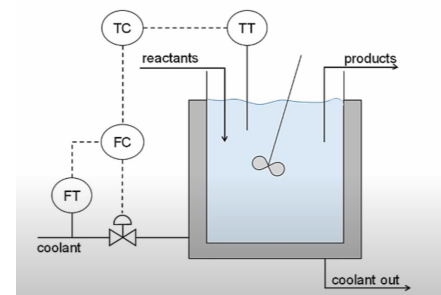
$$\frac{Y_2(s)}{D_2(s)} = G_V(s)G_2(s)$$

- 可见，串级控制系统中二次扰动的等效扰动是单回路控制系统中的

$$\frac{1}{1 + G_{c2}(s)G_V(s)G_2(s)G_{m2}(s)}$$



例
主参数 y_1 ：反应器温度
副参数 y_2 ：冷却剂流量



串级控制系统的特点分析



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 特点1：能迅速克服二次扰动的影响

- 串级控制系统副环扰动通道传递函数
(二次干扰对副参数的影响)：

$$\frac{Y_2(s)}{D_2(s)} = \frac{G_V(s)G_2(s)}{1 + G_{c2}(s)G_V(s)G_2(s)G_{m2}(s)}$$

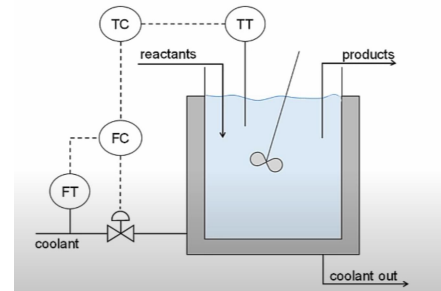
- 单回路控制系统二次干扰传递函数：

$$\frac{Y_2(s)}{D_2(s)} = G_V(s)G_2(s)$$

- 可见，串级控制系统中二次扰动的等效扰动是单回路控制系统中的

$$\frac{1}{1 + G_{c2}(s)G_V(s)G_2(s)G_{m2}(s)}$$

例
主参数 y_1 ：反应器温度
副参数 y_2 ：冷却剂流量



$$\begin{cases} G_2(s) = \frac{K_2}{T_2s + 1} \\ G_{c2}(s) = K_{c2} \quad G_V(s) = K_V \quad G_{m2}(s) = K_{m2} \end{cases}$$

- 稳态余差为单回路控制系统的

$$\frac{1}{1 + K_{c2}K_VK_2K_{m2}}$$

串级控制系统的特点分析



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 特点1：能迅速克服二次扰动的影响

• 串级控制系统传递函数：

二次扰动影响

$Y_1(s)$ 对 $D_2(s)$

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

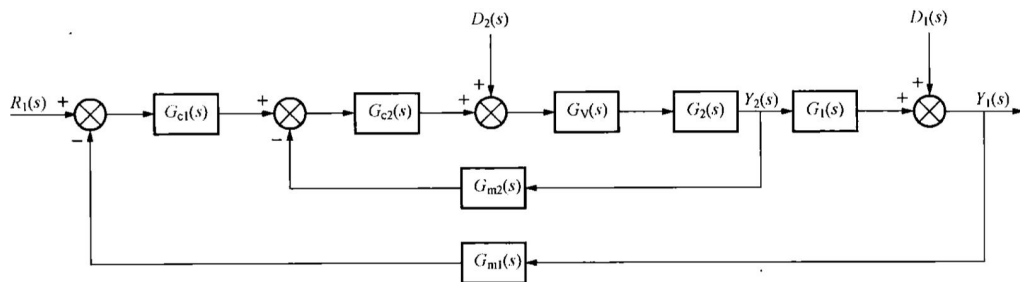
系统输出/输入

$Y_1(s)$ 对 $R_1(s)$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

克服干扰能力

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = G_{c1}(s)G_{c2}(s)$$

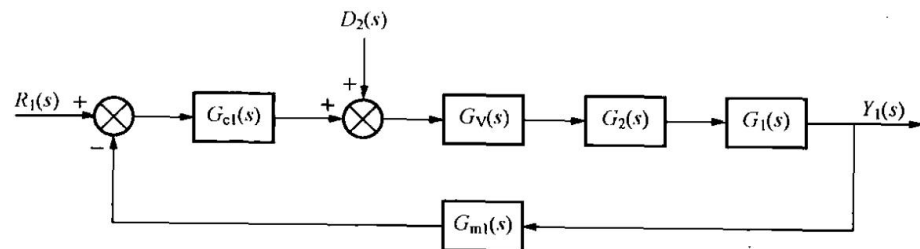


• 单回路控制系统传递函数：

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = G_{c1}(s)$$



串级控制系统的特点分析



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 特点1：能迅速克服二次扰动的影响

• 串级控制系统传递函数：

二次扰动影响

$Y_1(s)$ 对 $D_2(s)$

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

• 单回路控制系统传递函数：

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

系统输出/输入

$Y_1(s)$ 对 $R_1(s)$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

克服干扰能力

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} \bigg/ \frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \boxed{G_{c1}(s)G_{c2}(s)}$$

仅与控制器的
传递函数
有关

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = \boxed{G_{c1}(s)}$$

串级控制系统的特点分析



➤ 特点1：能迅速克服二次扰动的影响

• 串级控制系统传递函数：

二次扰动影响

$Y_1(s)$ 对 $D_2(s)$

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

• 单回路控制系统传递函数：

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

系统输出/输入

$Y_1(s)$ 对 $R_1(s)$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

克服干扰能力

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = G_{c1}(s)G_{c2}(s)$$

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = G_{c1}(s)$$

总放大倍数↑

采用
比例控制器

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = K_{c1}K_{c2} \rightarrow \text{系统克服二次干扰能力}\uparrow, \text{主参数过渡过程最大偏差}\downarrow$$

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = K_{c1}$$

串级控制系统的特点分析



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 特点1：能迅速克服二次扰动的影响

• 串级控制系统传递函数：

二次扰动影响

$Y_1(s)$ 对 $D_2(s)$

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

• 单回路控制系统传递函数：

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

系统输出/输入

$Y_1(s)$ 对 $R_1(s)$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c1}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

克服干扰能力

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} \bigg/ \frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = G_{c1}(s)G_{c2}(s)$$

$$K_{c1}K_{c2} > K_{c1}$$

串级系统由于副回路的存在，

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = G_{c1}(s)$$

采用
比例控制器

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} \bigg/ \frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = K_{c1}K_{c2}$$

提高了总放大倍数，

对进入副回路的二次干扰

具有较强的克服能力。

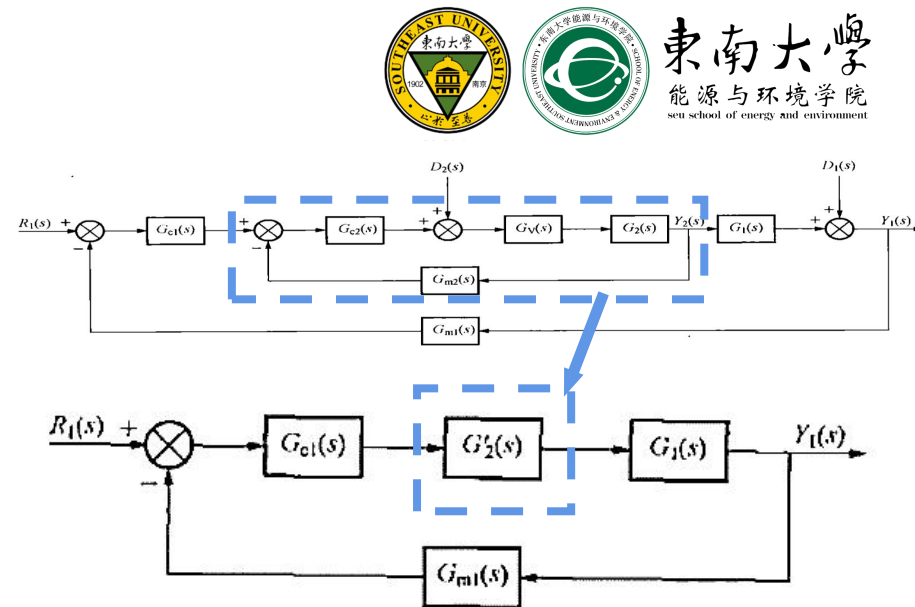
$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/D_2(s)} = K_{c1}$$

串级控制系统的特点分析

➤ 特点2：改善对象特性，减小等效时间常数

- 把整个副回路看做主回路中的一个环节，

$$G'_2(s) = \frac{G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s)}$$



串级控制系统的特点分析



➤ 特点2：改善对象特性，减小等效时间常数

- 把整个副回路看做主回路中的一个环节，

$$G'_2(s) = \frac{G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s)}$$

- 取副对象为一阶惯性环节，副控制器、执行器、副变送器均为比例环节，

$$\begin{cases} G_2(s) = \frac{K_2}{T_2s + 1} \\ G_{c2}(s) = K_{c2} \quad G_v(s) = K_v \quad G_{m2}(s) = K_{m2} \end{cases}$$

- 代入上式，得

$$G'_2(s) = \frac{K_{c2}K_vK_2 / (1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2})}{T_2s / (1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2}) + 1} = \frac{K'_2}{T'_2s + 1}$$

串级控制系统的特点分析



➤ 特点2：改善对象特性，减小等效时间常数

- 串级系统副回路等效对象传递函数

$$G'_2(s) = \frac{K_{c2}K_vK_2 / (1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2})}{T_2s / (1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2}) + 1} = \frac{K'_2}{T'_2s + 1}$$

- 副回路等效对象静态增益和时间常数

$$\begin{cases} K'_2 = \frac{K_{c2}K_vK_2}{1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2}} \\ T'_2 = \frac{T_2}{1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2}} \end{cases}$$

$$\frac{1}{1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2}} < 1$$

T_2

- 副对象传递函数

$$G_2(s) = \frac{K_2}{T_2s + 1}$$

- 副对象时间常数

- 副回路控制对象时间常数 T'_2 较副对象时间常数 T_2 缩小
- 控制通道控制过程加快，有助于克服整个系统的惯性滞后

串级控制系统的特点分析



➤ 特点3：提高系统工作频率

• 串级控制系统传递函数：

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

• 串级控制系统特征方程：

$$1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_2(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_1(s)G_2(s)G_{m1}(s) = 0$$

假定：
主、副对象为惯性环节
其它均为比例环节

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{K_1}{T_1s+1}, & G_{c1}(s) &= K_{c1}, & G_{m1}(s) &= K_{m1}, & G_v(s) &= K_v \\ G_2(s) &= \frac{K_2}{T_2s+1}, & G_{c2}(s) &= K_{c2}, & G_{m2}(s) &= K_{m2} \end{aligned}$$

• 二次形式

$$T_1T_2s^2 + (T_1 + T_2 + K_{c2}K_vK_2K_{m2}T_1)s + (1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2} + K_{c1}K_{c2}K_vK_2K_1K_{m1}) = 0$$

串级控制系统的特点分析



➤ 特点3：提高系统工作频率

$$T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2 + K_{c2} K_v K_2 K_{m2} T_1) s + (1 + K_{c2} K_v K_2 K_{m2} + K_{c1} K_{c2} K_v K_2 K_1 K_{m1}) = 0$$

- 与二阶标准式 $s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2 = 0$ 比较

$$2\xi\omega_0 = \frac{T_1 + T_2 + K_{c2} K_v K_2 K_{m2} T_1}{T_1 T_2}, \quad \omega_0^2 = \frac{1 + K_{c2} K_v K_2 K_{m2} + K_{c1} K_{c2} K_v K_2 K_1 K_{m1}}{T_1 T_2}$$

- 串级系统工作频率

$$\omega_{\#} = \sqrt{1 - \xi^2} \omega_0 = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{2\xi} \frac{T_1 + T_2 + K_{c2} K_v K_2 K_{m2} T_1}{T_1 T_2}$$

串级控制系统的特点分析



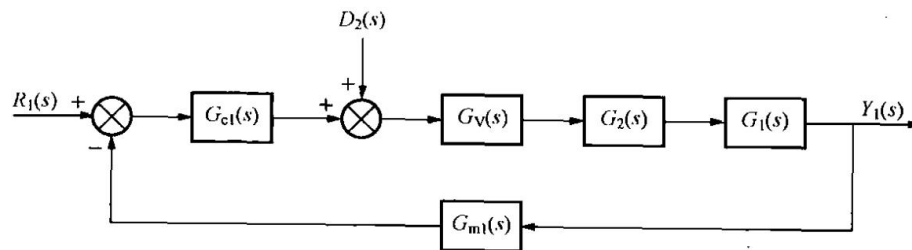
➤ 特点3：提高系统工作频率

- 单回路控制系统传递函数：

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{cl}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)}{1 + G_{cl}(s)G_v(s)G_2(s)G_1(s)G_{m1}(s)}$$

- 单回路控制系统特征方程：

$$1 + G_{cl}(s)G_v(s)G_1(s)G_2(s)G_{m1}(s) = 0$$



假定：
主、副对象为惯性环节
其它均为比例环节

$$G_1(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1}, \quad G_{cl}(s) = K_{cl}, \quad G_{m1}(s) = K_{m1}, \quad G_v(s) = K_v$$
$$G_2(s) = \frac{K_2}{T_2s + 1}$$

- 二次形式

$$T_1T_2s^2 + (T_1 + T_2)s + (1 + K_{cl}K_vK_1K_2) = 0$$

串级控制系统的特点分析



➤ 特点3：提高系统工作频率

$$T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + (1 + K_{c1} K_v K_1 K_2) = 0$$

- 与二阶标准式 $s^2 + 2\xi'\omega'_0 s + \omega_0'^2 = 0$ 比较

$$2\xi'\omega'_0 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}, \quad \omega_0'^2 = \frac{1 + K_{c1} K_v K_{m1} K_1 K_2}{T_1 T_2}$$

- 单回路系统工作频率

$$\omega_n = \frac{\sqrt{1 - \xi'^2}}{2\xi'} \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}$$

串级控制系统的特点分析



➤ 特点3：提高系统工作频率

• 串级系统工作频率

$$\omega_{\text{串}} = \sqrt{1 - \xi^2} \omega_0 = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{2\xi} \frac{T_1 + T_2 + K_{c2}K_vK_2K_{m2}T_1}{T_1T_2}$$

• 单回路系统工作频率

$$\omega_{\text{单}} = \frac{\sqrt{1 - \xi'^2}}{2\xi'} \frac{T_1 + T_2}{T_1T_2}$$

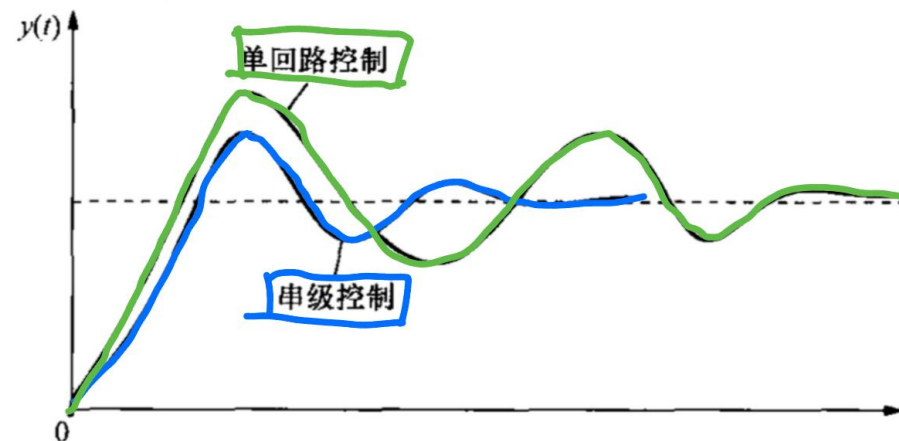
• 若串级控制系统和单回路控制系统有相同的阻尼系数

$$\xi_{\text{串}} = \xi_{\text{单}} \quad \text{即} \quad \xi = \xi', \quad \text{则}$$

$$\frac{\omega_{\text{串}}}{\omega_{\text{单}}} = \frac{1 + (1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2})T_1/T_2}{1 + T_1/T_2} > 1$$

• 由于 $(1 + K_{c2}K_vK_2K_{m2}) > 1$, 则 $\omega_{\text{串}} > \omega_{\text{单}}$

• 串级控制系统工作频率高于单回路控制系统



串级控制系统的特点分析



➤ 特点4：对负荷及操作条件变化有一定自适应能力

- 实际过程对象都具有不同程度的非线性，随着操作条件和负荷变化，对象静态增益 K 将发生变化
- 控制器参数整定，在一定负荷、一定工作点下，针对一定指标进行，只能适应工作点附近的一个小范围
- 如果负荷变化超出一定范围，工作点偏移较远，对象增益将发生明显改变，系统回路增益发生变化，原来整定的控制器参数不再适用，控制质量将下降
- 串级控制系统：
固定静态增益→改善对象非线性→控制器参数不需要频繁调整→自适应

串级控制系统的特点分析



➤ 特点4：对负荷及操作条件变化有一定自适应能力

- 副控制器设定值能随负荷及操作条件变化而变化

- 从副回路等效放大倍数看

$$K_2' = \frac{K_{c2} K_v K_2}{1 + K_{c2} K_v K_2 K_{m2}} \approx \frac{1}{K_{m2}}$$

- 负荷变化时，对象特性 K_2 改变，而等效对象放大倍数 K_2' 基本不变，副环静态增益不变，系统仍具有较好控制品质



- 串级控制系统的特点分析
- 串级控制系统的应用范围
- 串级控制系统的设计原则
- 串级控制系统的参数整定

- 对象控制通道迟延时间长
- 对象时间常数大
- 负荷变化大，对象非线性
- 干扰变化剧烈、幅值大

串级控制系统的应用范围



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 对象控制通道迟延时间较长

- 单回路控制

- 迟延时间 τ 较长，满足不了控制质量要求
- 微分作用可改善迟延， τ 过大时微分作用有限

- 串级控制系统

- 迟延较小处选择副参数
- 干扰纳入副回路中，干扰影响主参数前及时在副参数得到反映
- 通道迟延小，调节及时，提高控制质量

串级控制系统的应用范围



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 对象时间常数大

- 单回路控制系统

- 过渡过程时间长，调节时间长
- 超调量大，参数回复慢

- 串级控制系统

- 选择时间常数较小的副参数，构成副回路，是等效对象时间常数减小
- 提高工作频率，加快反应速度，缩短控制时间

串级控制系统的应用范围



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 负荷变化较大，被控对象非线性较大

- 单回路控制系统

- 工作点移动，对象放大倍数变化，调节阀工作特性补偿有限
- 控制器整定参数需频繁改变

- 串级控制系统

- 纳入具有较大非线性的对象
- 副回路衰减率改变，系统衰减率不变，自适应稳定系统

串级控制系统的应用范围



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 系统存在变化剧烈、幅值大干扰

• 串级控制系统

- 剧烈变化的干扰纳入副回路
- 副控制器比例带尽量小，主、副控制器放大倍数乘积尽量大
- 抗干扰能力提高，减小对主参数影响



- 串级控制系统的特点分析
- 串级控制系统的应用范围
- 串级控制系统的设计原则
- 串级控制系统的参数整定

- 副参数选择
- 主、副回路联系
- 主、副调节器选择

串级控制系统的设计原则



➤ 副回路的设计与副参数的选择

副回路是一个单回路，副参数选择需遵循以下原则：

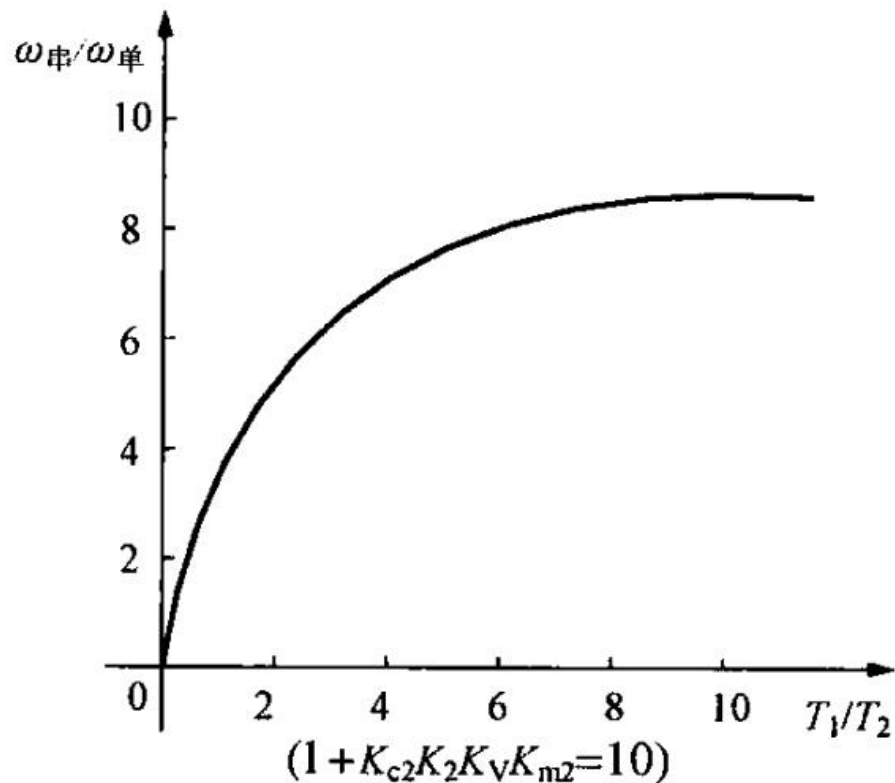
- 副参数物理可测，副对象时间常数小、纯迟延时间尽可能短
-> 充分发挥副回路的快速调节作用
- 副回路应尽量包含生产过程中最主要的、变化剧烈、频繁和幅度大的扰动，力求包含尽量多的扰动
- 主、副对象时间常数需适当匹配
 - 主副回路时间常数应该错开，防止“共振”发生
 - 一般选择 $T_1/T_2=3\sim 10$

串级控制系统的设计原则



➤ 副回路的设计与副参数的选择

- 主、副对象时间常数需适当匹配
 - 串级系统与单回路系统工作频率之比 $\omega_{串}/\omega_{单}$ 随主、副对象时间常数之比 T_1/T_2 变化曲线
 - 副回路选择希望 T_2 小，以加快调节作用；但 T_2 过小无益于提高工作频率， $T_1/T_2=3\sim 10$
 - T_2 过大，反应不灵敏，二次干扰不能及时克服
 $T_1/T_2 < 3$
 - 主、副回路振荡，“共振效应”，振荡相互促进加剧” $T_1/T_2 \approx 1$



串级控制系统的设计原则



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 串级控制系统中主、副控制器的选择

- 主控制器起定值控制作用，被控变量要求无余差，一般采用PI或PID控制
- 副控制器对主控制器起随动作用，副被控变量允许在一定范围内变动，无消除余差要求，一般采用P或PI
- 调节快的控制器（如流量控制器）：
 - 加积分减弱控制作用
- 调节慢的控制器（如温度控制器）：
 - 回路容量大，可加微分

串级控制系统的设计原则



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 主、副调节器正反作用的选择

(1) 确定控制阀气开/气关

说明：

(2) 确定副对象特性

正、反作用

(3) 确定控制器正反作用

正、反特性

(4) 确定主对象特性

(5) 确定主控制器正反作用

串级控制系统的设计原则



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 主、副调节器正反作用的选择

(1) 确定控制阀气开/气关

(2) 确定副对象特性

(3) 确定控制器正反作用

(4) 确定主对象特性

(5) 确定主控制器正反作用

控制系统各环节的极性规定：

- 控制器**正作用**：
系统测量值减给定值增加，控制器输出也**增加**
- 控制器**反作用**：
系统测量值减给定值增加，控制器输出却**减小**

串级控制系统的设计原则



➤ 主、副调节器正反作用的选择

(1) 确定控制阀气开/气关

(2) 确定副对象特性

(3) 确定控制器正反作用

(4) 确定主对象特性

(5) 确定主控制器正反作用

控制系统各环节的极性规定：

- 控制对象的**正特性**：
控制对象输入量增加，其输出也**增加**
- 控制对象的**反特性**：
控制对象输入量增加，其输出却**减小**。
- **测量变送单元**的输入增加其输出也增加为正特性
- **测量变送单元**的输入增加其输出减小为反特性
- **气开**调节阀为正特性
- **气关**调节阀为反特性



- 串级控制系统的特点分析
- 串级控制系统的应用范围
- 串级控制系统的设计原则
- 串级控制系统的参数整定

- 工作频率接近，逐步逼近法
- 工作频率相差大，两步整定法
- 简化过程，一步整定法

串级控制系统的参数整定



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

串级控制系统常用的控制器参数整定方法有3种：

- 逐步逼近法
- 两步整定法
- 一步整定法

串级控制系统的参数整定



➤ 逐步逼近法

(1) 首先整定副环：

先断开主环，按单回路整定方法，求得控制器的第一次整定参数，记做 $[G_{c2}]_1$ 。

(2) 再整定主环：

把刚整定好的副环作为主环的一个环节，仍按单回路整定方法，求取控制器的整定参数，记作 $[G_{c1}]_1$ 。

(3) 再次整定副环：

注意此时副回路、主回路均闭合。

在主控制器的整定参数均为 $[G_{c1}]_1$ 的条件下，按单回路整定方法，重新求取控制器的整定参数 $[G_{c2}]_2$ 。

串级控制系统的参数整定



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

➤ 逐步逼近法

(4) 重新整定主环：

同样是在两个回路闭合、副控制器整定参数为 $[G_{c2}]_2$ 的情况下，重新整定主控制器，得到 $[G_{c1}]_2$ 。

至此完成一个循环的整定。

(5) 如果整定过程仍未达到品质要求，按上面(3)、(4)步骤继续进行，直到达到控制效果满意为止。

串级控制系统的参数整定



➤ 两步整定法

(1) 先整定副环：

在主、副环均闭合，主、副控制器均置于纯比例作用条件下，
将主控制器比例带 δ_1 置于100%，采用4：1衰减曲线法得到副对象
出现4：1衰减过程时的比例带 δ_{2s} 和副对象振荡周期 T_{2s} 。

(2) 再整定主环：

将副控制器的比例带 δ_2 置于 δ_{2s} 上，用同样的方法整定主回路，
得到主对象出现4：1衰减时的比例带 δ_{1s} 和主对象的振荡周期 T_{1s} 。

(3) 根据上面求得的 δ_{1s} 、 T_{1s} 和 δ_{2s} 、 T_{2s} 值，结合主副控制器选型，
利用“衰减曲线法”计算公式，求出各控制器的整定参数。

串级控制系统的参数整定



➤ 一步整定法

依据：

在串级控制中，一般主控制器参数是工艺的主要操纵指标，直接关系到产品质量，因此对它要求严格。而对副控制器参数要求不很高，允许它在一定范围变化。

副控制器参数匹配范围

系统	参数	
	K_{c2}	$\delta_2(\%)$
温度	5 ~ 1.5	20 ~ 60
压力	3 ~ 1.3	30 ~ 70
流量	2.5 ~ 1.25	40 ~ 80
液位	5 ~ 1.25	20 ~ 80

串级控制系统思考题



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

1. T_1 、 T_2 之比多少比较合适？

A. $T_1/T_2 < 3$

B. $3 < T_1/T_2 < 10$

C. $T_1/T_2 = 1$

2. 时间变化很快的对象，是否适合用串级控制？

3. 系统存在变化剧烈和幅值很大的干扰，但是只能在主回路出现，使用串级控制能否有很好的控制性能？

串级控制系统思考题



東南大學
能源与环境学院
seu school of energy and environment

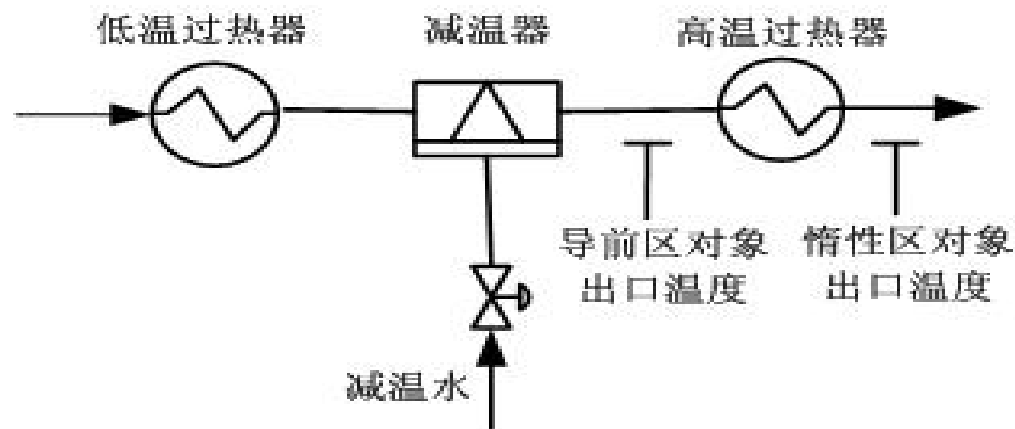
1. 串级系统设计副控回路时应当注意什么？
2. 如何选择串级控制系统的主、副调节器？
3. 导前信号点选取的原则是什么？
4. 串级系统为什么能提高控制性能？
5. 串级控制系统如何避免主副回路产生共振？
6. 串级控制系统有哪二种整定方法？如何进行整定？
7. 当对象特性延迟和惯性较大时，如何设计控制系统来提高控制性能？
8. 串级控制系统有哪些特点？

串级控制系统仿真练习



东南大学
能源与环境学院
seu school of energy and environment

过热汽温串级控制系统仿真，系统对象结构如图：



100%负荷， $D=527.8 \text{ kg/s}$

导前对象 ($^{\circ}\text{C/kg/s}$)	惰性对象 ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$)
$-\frac{0.815}{(1+18s)^2}$	$\frac{1.276}{(1+18.4s)^6}$

分别在内扰（给水流量）、外扰、设定值扰动时，仿真控制过程。
主控制器PID，副控制器PI。